

基于AHP-FCE的深度学习能力评价模型的构建研究

周慧敏, 陆海华

南通大学理学院, 江苏 南通

收稿日期: 2023年7月13日; 录用日期: 2023年9月20日; 发布日期: 2023年9月27日

摘要

深度学习能力的评价是典型的多指标复杂型综合性评价, 主要表现在四个维度: 认知维度、思维维度、技能维度、情感维度。层次分析法(AHP)可以人为控制某些指标的权重, 对定性指标进行量化处理, 使主观判断变为客观描述; 模糊综合评价法(FCE)可以将定性评价转化为定量评价, 对受到多种因素制约的深度学习能力进行总体评价, 能够较好地解决模糊、难以量化的问题。本研究将采用层次分析法确定深度学习能力的评价因素权重, 利用模糊综合评价法建立评价模型, 量化出深度学习能力评价的等级, 最终进行指标体系构建和评价研究。

关键词

层次分析法, 模糊综合评价法, 深度学习能力评价模型

Research on the Construction of Deep Learning Ability Evaluation Model Based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation

Huimin Zhou, Haihua Lu

School of Science, Nantong University, Nantong Jiangsu

Received: Jul. 13th, 2023; accepted: Sep. 20th, 2023; published: Sep. 27th, 2023

Abstract

The evaluation of deep learning ability is a typical multi-index and complex comprehensive evalu-

ation. It is mainly manifested in the following four dimensions: cognitive dimension, dimension of thinking, skill dimension, emotional dimension. Analytic hierarchy process can artificially control the weight of some indicators, quantify qualitative indicators, and make subjective judgment into objective description. The fuzzy comprehensive evaluation method can transform the qualitative evaluation into the quantitative evaluation, and make the overall evaluation of the deep learning ability restricted by many factors, which can better solve the problems of fuzzy and difficult to quantify. In this study, Analytic hierarchy process will be used to determine the evaluation factor weight of deep learning ability, and fuzzy comprehensive evaluation method will be used to establish the evaluation model, quantify the level of deep learning ability evaluation, and finally conduct the index system construction and evaluation research.

Keywords

Analytic Hierarchy Process, Fuzzy Comprehensive Evaluation, Evaluation Model of Deep Learning Ability

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当今世界教育发展的主要趋势是：教育已经成为贯穿全体公民一生的终身教育，促进人全面发展的素质教育，突出学习者个性的创新教育。学习者的终身学习能力、自主学习能力、创新能力都要以深度学习能力为基础[1]。如何测评学生深度学习能力成为当今教育界的重要课题。

深度学习能力的评价是典型的多指标复杂的综合性评价，目前国内外关于多指标综合评价的方法很多，根据确定权重方法的不同，大致分为两类：客观赋权重法(如主成分分析法、因子分析法等)和主观赋权重法(如层次分析法、德尔菲法等)。层次分析法可以人为控制某些指标的权重，对大量定性指标量化处理，使主观判断变为客观描述，评价结果的直观性和可操作性较高；模糊综合评价法可以将定性评价转化为定量评价，对受到多种因素制约的对象进行总体评价，能够较好地解决模糊、难以量化的问题。

本研究将采用层次分析法确定深度学习能力的评价因素权重，利用模糊综合评价法建立评价模型，量化出深度学习能力评价的等级，对其进行指标体系构建和评价研究。

2. 深度学习

深度学习起源于脑科学以及人工智能领域，随着计算机网络、科学技术的发展，20世纪80年代，深度学习的概念及思想逐渐应用到教育学领域中，并得到深入的研究和发展。1976年，美国学者马顿(Marton F.)和萨尔约(Saljo R.)在《论学习的本质区别：结果和过程(On Qualitative Difference in Learning: Outcome and Process)》一文中明确提出了表层学习和深层学习的概念[2]。这被普遍认为是教育学领域首次明确提出深度学习的概念。在教育领域中，黎加厚教授对深度学习进行系统分析和阐述，包括深度学习的概念、特征及促进深度学习的教学策略等内容[3]。张浩从深度学习的概念特征入手，将表层的学习方式与深度的学习方式带来的差异进行对比分析，总结出深度学习的综合性、高阶性及整合迁移等特征，从认知心理学的角度分析深度学习的特点，并认为深度学习与浅层学习存在明显的差异[4]。

学习评价是以目标为依据，运用观察、反思、调查、测验等方法，收集学习过程及结果等方面的客观资料，进行相应地处理，对学习效果做出鉴定和价值判断，对学习目标进行反思和修订的活动[5]。深

深度学习是一种特殊的学习方式, 因此深度学习评价与学习评价存在一致性。深度学习评价是以深度学习目标为依据, 运用观察、反思、调查、测验等方法, 收集深度学习过程及结果等方面的客观资料, 进行相应地处理, 对深度学习效果做出鉴定和价值判断, 对深度学习目标进行反思和修订的活动。深度学习能力评价是指对学生的学习行为和结果进行测量的过程, 是一个用过去制定的评价指标体系来比较评价学生的学习能力, 并最终将评价结果进行反馈的过程。

3. 深度学习能力评价模型

深度学习能力评估过程包括: 深度学习能力因素识别、深度学习能力因素权重计算、模糊综合评判和深度学习能力评估。深度学习能力因素识别就是要弄了解深度学习能力因素的组成、各因素的性质和相互间的关系等; 深度学习能力权重计算是计算出评价因素间的权重大小, 确定各因素对深度学习能力的影响值; 模糊综合评判是根据深度学习能力因素权重大小和其隶属度矩阵进行综合评判, 给深度学习能力因素的定量分析结果, 按最大隶属度法则给出深度学习能力评价等级。

本评价模型的具体过程为: 将深度学习能力评价项目划分为目标层、主准则层和分准则层的递阶层次结构模型; 针对主准则层和分准则层建立深度学习能力评价因素集; 利用层次分析法来确定主准则层和分准则层中各因素相对应的权重集; 利用模糊综合评判方法将已确定的评价因素集与对应权重系数集的模糊隶属关系构造模糊评价矩阵; 进行第一级模糊综合评判深度学习能力; 进行第二级模糊综合评判深度学习能力; 量化深度学习能力评价等级结果, 如图 1 所示。

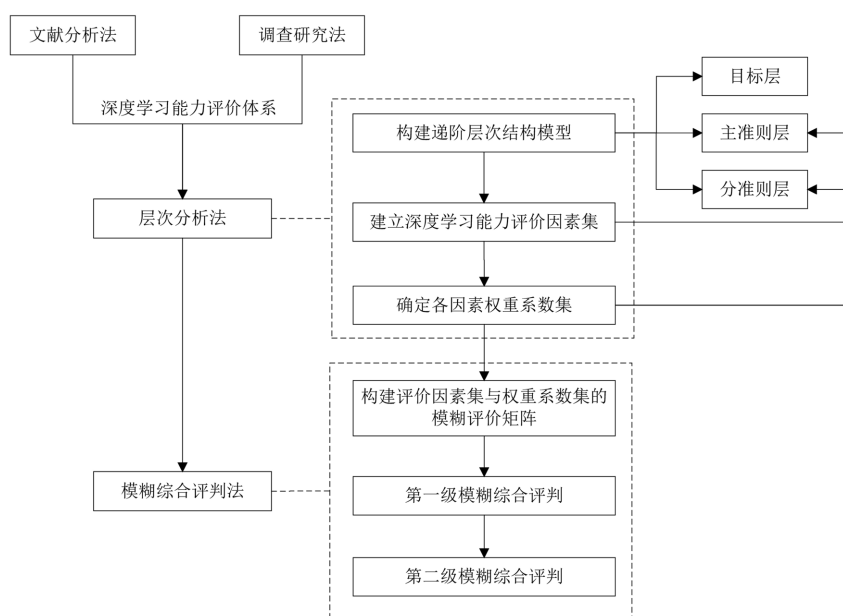


Figure 1. Flowchart of the deep learning ability evaluation model
图 1. 深度学习能力评价模型的流程图

3.1. 设计多理论综合的深度学习能力评价体系

深度学习能力是学习者进行深度学习过程中体现的能力, 深度学习能力的评价就是根据学习目标合理选择评价方法。目前应用最广的是将其分为认知、技能和情感三大维度, 具体采用布鲁姆的认知目标分类法、辛普森的动作技能目标分类法和克拉斯沃尔的情感目标分类法。深度学习以高阶思维为核心, 因此对于深度学习能力的评价要关注学习者思维能力的发展[6], 基于此, 本文将纳入 SOLO 分类法作为

思维目标的理论依据, 构建如图 2 所示的深度学习能力评价体系。

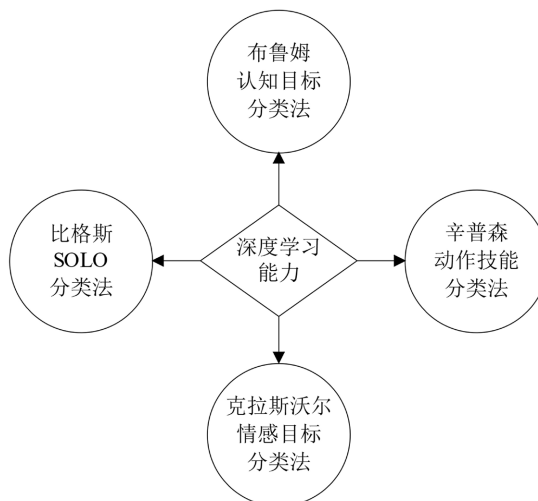


Figure 2. Multi-theoretical and comprehensive deep learning ability evaluation system
图 2. 多理论综合的深度学习能力评价体系

3.1.1. 认知维度：布鲁姆——认知目标分类法

布鲁姆将认知目标分为知道、领会、应用、分析、综合和评价六个层次[7]。安德森等人进行修订后, 将认知领域分为记忆、理解、应用、分析、评价和创造由低到高六个层次。

浅层学习能力的认知水平停留于记忆、理解的较低层次, 主要是指在外力驱动下, 采用简单的记述、重复训练和强化记忆的方式习得新知识的学习形式。深度学习能力的认知水平处于应用、分析、评价、创造的较高层次, 主要是指学习者通过对特定主题进行持续研究, 达到对知识意义的深度理解, 此时学习者所获得的是高阶能力。基于此, 教育者可编制书面测试题考查学习者的认知情况, 实现对深度学习能力的评估。

3.1.2. 思维维度：比格斯——SOLO 分类法

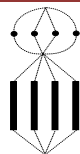
从思维层次来看, 浅层学习主要是运用低阶思维进行机械学习; 深度学习主要表现在运用高阶思维进行有意义学习。在思维结构上, 通过学生对问题的反应的复杂性来判断其所处的发展阶段, 进而确定对问题理解的深度, 这是由教育心理学家比格斯和克里斯所提出的一种质性评价方法, 即 SOLO (Structure of the Observed Learning Outcome) 分类法[8]。

Table 1. The structure level of learning ability in the thinking dimension

表 1. 思维维度上学习能力结构层次

类型	图示	层次	内涵
无学习		前结构	学生容易被情境中的无关知识信息所迷惑或误导, 对问题的反应无意义
浅层学习		单一结构	学生只关注与问题解决相关的一个知识信息
		多元结构	学生使用孤立的知识来解决问题, 缺乏整合能力, 未建立知识信息之间的联系
深度学习		关联结构	学生整合对知识的理解, 建立知识之间的联系, 形成知识结构来解决较为复杂的具体问题

Continued



抽象拓展结构

学生对问题进行更全面的思考, 概括出更抽象的特征, 生成一般性的假设并应用到新情境中, 拓展问题本身的意义

如表 1 所示, SOLO 层次反映学习者从前机构到多元结构层次发展的量变过程, 从多元机构到关联结构层次发展的质变过程。深度学习过程主要表现在学习者可以综合利用提炼、归纳、整合等高阶思维对信息进行联系、加工、处理和转换, 生成新的拓展结构。在此过程中, 既体现了对深度学习中高阶思维的追求, 实现质的评价、量的分析的综合, 又能为深度学习能力评价、高阶思维的评估提供理论支持。

3.1.3. 技能维度：辛普森——动作技能分类法

辛普森将动作技能领域目标分为由低到高的七个层次：知觉、准备、有指导的反应、机械动作、复杂的外显反应、适应和创新[9]。由于知觉和准备这两个层次较难察觉, 因此在实践应用中, 仅将其限定在后五个层次上, 它们与浅层学习、深度学习之间的关系如表 2 所示。

Table 2. The structure level of learning ability on the skill dimension

表 2. 技能维度上学习能力结构层次

类型	层次	内涵
浅层学习	有指导的反应	在原型示范和他人指导下完成简单的动作技能
	机械动作	能独立完成简单的动作技能
深度学习	复杂的外显反应	能熟练完成复杂的动作模式
	适应	能修正自己的动作模式, 以满足新情境的需要
	创新	能创造新的动作模式, 以适应具体的新情境

浅层学习关注的是低水平、简单的技能, 对应于有指导的反应、机械动作这两个较低层次; 深度学习关注的是高水平、复杂的技能, 对应于复杂的外显反应、适应、创新这三个较高层次。根据辛普森的动作技能分类法, 可设计出合理的表现性评价活动, 对动作技能目标的达成情况进行评估。

3.1.4. 情感维度：克拉斯沃尔——情感目标分类法

情感培养是教学的重要目标, 克拉斯沃尔将情感领域的教育目标分为由低到高的五个层次：接受、反应、价值评价、组织及价值体系个性化[10]。浅层学习关注的是简单的情感投入, 对应于接受、反应这两个较低层次; 深度学习关注的是高水平的情感投入, 对应于价值评价、组织、价值体系个性化这三个较高层次。

深度学习需要情感投入, 具体表现为学习者对学习任务表现出较强的学习兴趣, 想要把它学好, 始终保持积极的状态, 拥有克服困难的韧劲。浅层学习则是知识的机械堆积, 缺少学习者的情感共鸣。根据克拉斯沃尔的情感领域分类法, 可设计出评价量表, 对情感维度目标的达成情况进行评估。

3.2. 基于 AHP 的递阶层次结构模型

层次分析法(简称 AHP)是由美国运筹学家托马斯·塞蒂是(T.L.Saaty)于 20 世纪 70 年代初期提出的一种将网络系统理论与多目标综合的评价方法[11]。AHP 算法是一种定性定量相结合的决策分析方法, 它是一种将决策者对复杂系统的决策思维过程模型化、数量化的过程。应用这种方法, 决策者通过将复杂问题分解为若干层次和若干因素, 在各因素之间进行简单的比较和计算, 就可以得出不同方案的权重, 为最佳方案的选择提供依据, 如图 3 所示。

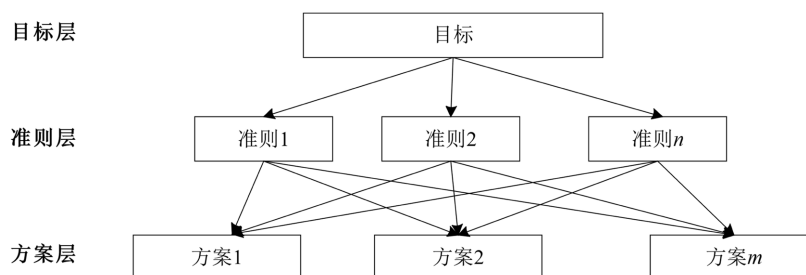


Figure 3. Structure of the Analytic Hierarchy Process

图 3. 层次分析法的结构

3.2.1. 识别深度学习能力评价因素

在递阶层次结构模型中, 将深度学习能力评价项目所包含的评价因素分层, 划分为目标层、主准则层和分准则层。目标层用来表示学生深度学习能力评价, 主准则层为进行学生深度学习能力所包含的主要因素类型的名称, 分准则层为各主要因素类所包含的单因素名称, 如图 4 所示。

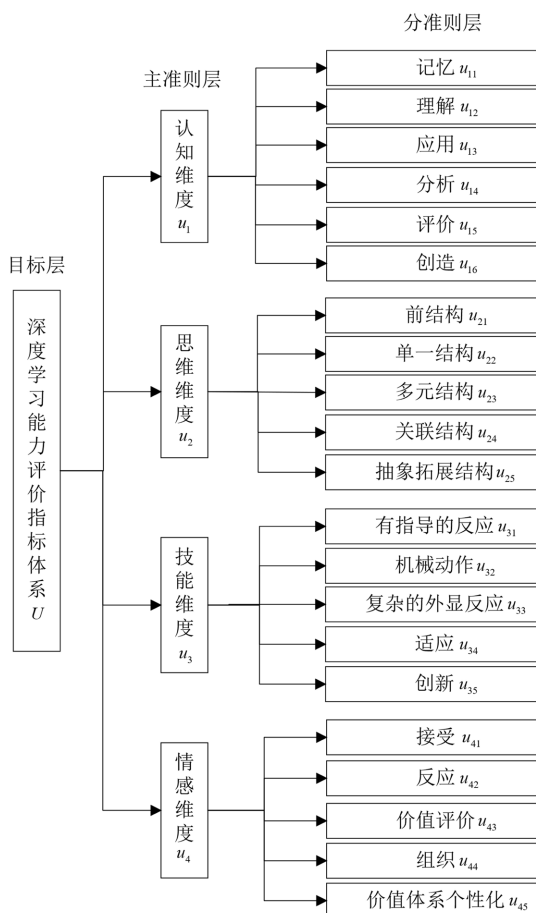


Figure 4. Deep learning ability evaluation index system

图 4. 深度学习能力评价指标体系

3.2.2. 建立深度学习能力评价因素集

在递阶层次结构模型中, 主准则层定义的评价因素集为 $U = (u_1, u_2, u_3, u_4)$, 分准则层定义的评价因素

集为 $u_k = (u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kn_k})$, $k = 1, 2, 3, 4$ 。 n_k 用来表示主准则层中第 k 类主因素包含的单因素的数目为 n 。

3.2.3. 确定深度学习能力评价因素的权重

由于学生深度学习能力评价各因素的重要性各不相同, 所以应根据各因素对学生深度学习能力影响的重要程度关系来确定加权系数, 利用层次分析法来确定主准则层和分准则层中各因素相对应的权重集。

1) 构造判断矩阵

首先将因素集中各因素进行两两比较, 比较结果的重要度利用 9 级标度法 1~9 来表示, 比如认知维度用 u_1 表示, 思维维度用 u_2 表示, 比较结果 u_{12} 表示认知维度相对思维维度的重要度, 比较结果 u_{21} 表示思维维度相对认知维度的重要度。这样就可以把各评价因素比较, 构建出判断矩阵 A , 其中各准则层中各个元素相对重要性的值由专家评判小组来确定。

$$A = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix}$$

按照该构造判断矩阵的方法, 主准则层可以构造一个 4 阶的判断矩阵 A , 如公式所示。分准则层的四类具体单因素集可以构造 4 个阶数不同、分别为 n_k 的判断矩阵 A_k , 共得到 5 个判断矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 4 \\ 2 & 1 & 1 & 8 \\ 2 & 1 & 1 & 7 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & \frac{1}{7} & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 6 & 7 \\ \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 3 & 6 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 1 & 2 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 2 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 2 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 & 2 & 1 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{5} & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 5 & 1 & 2 \\ \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 6 & 7 \\ \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 2 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 1 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 & 6 & 2 \\ \frac{1}{4} & 1 & 1 & 2 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & 1 & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & 2 & 3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

将判断矩阵的各个行向量 W 取平均后得 \bar{W} ，使其标准化后得 $\tilde{W} = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j}$ 。

由于 $A\tilde{W} = \lambda_{\max}\tilde{W}$ ，所以 $\lambda_{\max} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\tilde{W})_i}{\tilde{W}_i}$ ，特征向量解就是评价因素在对应准则层中的重要性排名，即深度学习能力各评价指标体系中单因素的权重值。对于判断矩阵，分别进行计算，如表 3 所示。

Table 3. Eigenvector solution and maximum eigenvalue of the judgment matrix
表 3. 判断矩阵的特征向量解及最大特征值

判断矩阵	特征向量解	最大特征值
A	$W = [1.5000 \quad 3.0000 \quad 2.7500 \quad 0.3795]$ $\tilde{W} = [0.1966 \quad 0.3932 \quad 0.3604 \quad 0.0497]$	$\lambda_{\max} = 4.0042$
A_1	$W_1 = [4.0000 \quad 2.5833 \quad 1.8056 \quad 0.8389 \quad 0.8333 \quad 0.4266]$ $\tilde{W}_1 = [0.3814 \quad 0.2643 \quad 0.1722 \quad 0.0800 \quad 0.0795 \quad 0.0407]$	$\lambda_{\max} = 6.1741$
A_2	$W_2 = [2.8000 \quad 0.5800 \quad 1.2677 \quad 1.8000 \quad 0.7667]$ $\tilde{W}_2 = [0.3882 \quad 0.1756 \quad 0.0804 \quad 0.2495 \quad 0.1063]$	$\lambda_{\max} = 5.3985$
A_3	$W_3 = [4.0000 \quad 2.1000 \quad 1.1500 \quad 0.6000 \quad 0.5786]$ $\tilde{W}_3 = [0.4746 \quad 0.2492 \quad 0.1364 \quad 0.0712 \quad 0.0686]$	$\lambda_{\max} = 5.0156$
A_4	$W_4 = [3.6000 \quad 0.9500 \quad 0.7067 \quad 0.6000 \quad 1.9000]$ $\tilde{W}_4 = [0.4641 \quad 0.1225 \quad 0.0911 \quad 0.0774 \quad 0.2450]$	$\lambda_{\max} = 5.0382$

2) 一致性检验

利用求最大特征向量的方法确定各准则层中深度学习能力评价因素的权重值时，主要由专家来确定其值，因而不可能非常准确地判断，因此要对判断矩阵进行一致性检验，即进行相容性和误差性的分析。

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

其中， CI 为判断矩阵的一般一致性指标，计算公式为

$$CI = \frac{1}{n-1}(\lambda_{\max} - n)$$

RI 为判断矩阵的平均一致性指标，判断矩阵值如表 4 所示。

Table 4. Matrix judgment value of the RI
表 4. RI 判断矩阵值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当 $CR < 0.1$ 时，表示判断矩阵具有满意的一致性，说明权重系数合理，否则则需要对判断矩阵进行调整，直至取得满意结果。

对于判断矩阵 A , 将 λ_{\max} 代入公式计算后, 得 $CI = 0.0014$, $CR = \frac{0.0014}{0.90} = 0.0016$; 对于判断矩阵 A_1 , $CI = 0.0348$, $CR = \frac{0.0348}{1.24} = 0.0281$; 对于判断矩阵 A_2 , $CI = 0.0996$, $CR = \frac{0.0996}{1.12} = 0.0889$; 对于判断矩阵 A_3 , $CI = 0.0390$, $CR = \frac{0.0390}{1.12} = 0.0348$; 对于判断矩阵 A_4 , $CI = 0.0096$, $CR = \frac{0.0096}{1.12} = 0.0086$ 。

因为 $CR < 0.1$, 所以判断矩阵 A 所做的评价是具有满意的一致性, 说明权重系数分配合理。由此可以得到各评价因素所对应的权重值, 如表 5 所示。

Table 5. Deep learning ability evaluation index and weight
表 5. 深度学习能力评价指标及权重

一级指标		二级指标	
内容	权重	层次	权重
认知维度	0.1966	记忆	0.3814
		理解	0.2463
		应用	0.1722
		分析	0.0800
		评价	0.0795
		创造	0.0407
思维维度	0.3932	前结构	0.3882
		单一结构	0.1756
		多元结构	0.0804
		关联结构	0.2495
		抽象拓展结构	0.1063
技能维度	0.3604	有指导的反应	0.4746
		机械动作	0.2492
		复杂的外显反应	0.1364
		适应	0.0712
		创新	0.0686
情感维度	0.0497	接受	0.4641
		反应	0.1225
		价值评价	0.0911
		组织	0.0774
		价值体系个性化	0.2450

3.3. 基于 FCE 的深度学习能力评价模型

模糊数学是用精确的数学方法描述和研究模糊现象的一个数学工具。在深度学习能力评价指标体系中, 有可量化的指标, 如认知维度和技能维度等, 也有难以量化的指标, 如思维维度和情感维度等。量化指标可以通过计算得出具体数值从而进行评价, 而难以量化的指标则只能通过主观判断进行评价, 模糊综合评价法(简称 FCE)适用于指标难以量化, 划分界限较为模糊的评价过程[12]。因此, 本文选取模糊综合评价法, 在利用层次分析法确定权重的基础上, 将深度学习能力评价等级划分为: 好、较好、一般、较差、差共五个等级。通过结合模糊综合评判矩阵与权重得出评判分数, 从而确定评判等级, 具体步骤如下:

- 1) 确定评价因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$;

- 2) 确定评判集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$;
- 3) 确立隶属关系, 构建模糊评价矩阵。

由专家分别对各因素进行评分, 统计得分并进行归一化处理从而得到模糊评判矩阵: 所有单因素的模糊评判向量构成对因素模糊评判矩阵。

- 4) 模糊矩阵合成预算;

构造准则层评判矩阵 R , 计算评判向量: $B = \tilde{W}R$, \tilde{W} 为准则层权重矩阵。

- 5) 深度学习能力模糊综合评价结果。

根据模糊综合评价的最大隶属度原则, 令 $b = \max\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$, 深度学习评价等级就是 b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 中的最大分量 b 在评价等级集合 V 中所对应的等级。

此外, 通过模糊综合评价法不仅可以得出评价的结果值, 在评价过程中还可以计算出各个指标的评价值, 明确各维度的优势与不足, 为今后改善学习方式指明方向。

3.3.1. 建立评价因素集合与评价因素的权重集合

一级指标评价因素集合:

$$U = (u_1, u_2, u_3, u_4) = (\text{认知维度, 思维维度, 技能维度, 情感维度})$$

二级指标评价因素集合:

$$u_1 = (u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}, u_{16}) = (\text{记忆, 理解, 应用, 分析, 评价, 创造})$$

$$u_2 = (u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}, u_{25}) = (\text{前结构, 单一结构, 多元结构, 关联结构, 抽象拓展结构})$$

$$u_3 = (u_{31}, u_{32}, u_{33}, u_{34}, u_{35}) = (\text{有指导的反应, 机械动作, 复杂的外显反应, 适应, 创新})$$

$$u_4 = (u_{41}, u_{42}, u_{43}, u_{44}, u_{45}) = (\text{接受, 反应, 价值评价, 组织, 价值体系个性化})$$

一级指标对应权重向量:

$$\tilde{W} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3, \tilde{w}_4) = [0.1966 \quad 0.3932 \quad 0.3604 \quad 0.0497]$$

$\sum_{i=1}^4 \tilde{w}_i = 1$, 故 A 是归一化的。

二级指标对应权重向量:

$$\tilde{W}_1 = (\tilde{w}_{11}, \tilde{w}_{12}, \tilde{w}_{13}, \tilde{w}_{14}, \tilde{w}_{15}, \tilde{w}_{16}) = [0.3814 \quad 0.2463 \quad 0.1722 \quad 0.0800 \quad 0.0795 \quad 0.0407]$$

$$\tilde{W}_2 = (\tilde{w}_{21}, \tilde{w}_{22}, \tilde{w}_{23}, \tilde{w}_{24}, \tilde{w}_{25}) = [0.3882 \quad 0.1756 \quad 0.0804 \quad 0.2495 \quad 0.1063]$$

$$\tilde{W}_3 = (\tilde{w}_{31}, \tilde{w}_{32}, \tilde{w}_{33}, \tilde{w}_{34}, \tilde{w}_{35}) = [0.4746 \quad 0.2492 \quad 0.1364 \quad 0.0712 \quad 0.0686]$$

$$\tilde{W}_4 = (\tilde{w}_{41}, \tilde{w}_{42}, \tilde{w}_{43}, \tilde{w}_{44}, \tilde{w}_{45}) = [0.4641 \quad 0.1225 \quad 0.0911 \quad 0.0774 \quad 0.2450]$$

3.3.2. 确定评价等级集合

学生深度学习能力分为 5 个等级: 好、较好、一般、较差、差, 确定抉择集 V :

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{好, 较好, 一般, 较差, 差}\}$$

$V_j (j = 1, 2, 3, 4, 5)$ 指的是在评价中处于第 j 等级。

3.3.3. 确定隶属关系, 获得模糊评价矩阵

根据评价等级, 利用专家打分法对各指标进行打分, 例如, 聘请 10 专家对学生深度学习能力各维度进行打分, 有 3 位专家对“好”打分, 3 位专家对“较好”打分, 2 位专家对“一般”打分, 1 位专家对

“较差”打分, 1位专家对“差”打分, 则得出学生深度学习能力的评判向量为(0.3,0.3,0.2,0.1,0.1), 评价等级对应分数如表6所示。

Table 6. Evaluation level corresponds to the score
表 6. 评价等级对应分数

评价等级	好	较好	一般	较差	差
分数	5	4	3	2	1

由专家分别对各因素进行评分, 统计得分并进行归一化处理从而得到模糊评判矩阵 R_k , 在深度学习评价体系中, 专家打分构成的模糊评判矩阵, 如下:

$$R_k = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n_k 1} & r_{n_k 2} & \cdots & r_{n_k 5} \end{bmatrix}$$

其中 $r_{ij} = \frac{\text{对指标做出某等级评价的人数}}{\text{参与评价的总人数}}$, 即对 u_i 进行做出 V_j 评价结果的可能性程度, 记作隶属度 r_{ij} 。建立隶属度矩阵为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{53} & r_{55} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} & r_{65} \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \end{bmatrix} \quad R_4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \end{bmatrix}$$

3.3.4. 深度学习能力第一级模糊综合评判

对分准则层 U_k 中权重向量 \tilde{W}_k 和单因素评判矩阵 R_k 进行合成, 得到评判向量 B_k :

$$B_k = \tilde{W}_k R_k$$

$$\tilde{W}_k = [\tilde{w}_{k1} \quad \tilde{w}_{k2} \quad \cdots \quad \tilde{w}_{kn_k}]$$

$$R_k = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n_k 1} & r_{n_k 2} & \cdots & r_{n_k 5} \end{bmatrix}$$

建立一级模糊隶属向量:

$$B_k = \tilde{W}_k \cdot R_k = \begin{bmatrix} \tilde{w}_{k1} & \tilde{w}_{k2} & \cdots & \tilde{w}_{kn_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n_k 1} & \cdots & r_{n_k 5} \end{bmatrix} = [b_{k1} \quad b_{k2} \quad b_{k3} \quad b_{k4} \quad b_{k5}].$$

其中 $\tilde{w}_{k1} + \tilde{w}_{k2} + \cdots + \tilde{w}_{kn_k} = 1$, $r_{i1} + \cdots + r_{i5} = 1$, $i = 1, 2, \dots, n_k$ 。

3.3.5. 深度学习能力第二级模糊综合评判

在第一级模糊综合评判深度学习能力得到的隶属关系, 即由深度学习能力评价因素集 U 对于深度学习能力评价等级集合 V 的隶属向量 B_k , 可以构成总评价矩阵 R , 表示为:

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \end{bmatrix}.$$

再次对总评价矩阵 R 和主准则中各评价因素权重值 \tilde{W}_k , 进行模糊矩阵运算, 最终可得到深度学习能力评价目标层对于深度学习能力评价等级集合 V 的隶属向量:

$$B = \tilde{W} \cdot R = [\tilde{w}_1 \quad \tilde{w}_2 \quad \tilde{w}_3 \quad \tilde{w}_4] \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \end{bmatrix} = [b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4 \quad b_5].$$

3.3.6. 深度学习能力模糊综合评价结果

根据模糊综合评价的最大隶属度原则, 令 $b = \max\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$, 深度学习能力评价等级就是 b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 中的最大分量 b 在评价等级集合 V 中所对应的等级。

根据模糊综合评判的公式, 利用层次分析法得到的各个评价因素的权重值, 计算出一级模糊综合评判结果和二级综合评判结果, 最后得到深度学习能力评价结果, 如表 7 所示。

Table 7. Deep learning ability evaluation and the value of the secondary index evaluation

表 7. 深度学习能力评价二级指标评价价值

专家	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}	u_{25}
01	3	4	1	2	2	2	1	4	2	3	2
02	2	3	2	2	3	3	2	5	4	4	3
03	4	3	3	3	3	3	5	3	5	3	3
04	5	2	3	4	4	1	3	4	4	4	4
05	1	2	4	2	3	3	2	2	3	4	5
06	5	2	4	4	4	3	1	3	4	4	5
07	3	1	4	3	3	3	4	4	3	5	3
08	2	1	5	3	4	4	4	1	5	2	4
09	4	5	2	2	5	2	4	5	2	2	2
10	3	1	2	2	4	1	3	2	1	1	1

专家	u_{31}	u_{32}	u_{33}	u_{34}	u_{35}	u_{41}	u_{42}	u_{43}	u_{44}	u_{45}
01	1	4	4	5	3	4	5	4	5	5
02	1	3	5	5	1	5	4	2	3	2
03	3	2	3	4	4	4	3	5	4	1
04	2	3	3	1	5	3	4	3	5	4

Continued

05	3	2	2	3	4	5	2	5	4	3
06	3	4	4	4	5	2	1	4	5	5
07	4	4	5	2	3	3	2	1	3	1
08	4	5	4	5	4	5	3	3	5	5
09	5	2	5	1	2	1	5	5	2	4
10	2	4	1	3	5	2	1	4	5	5

5 表示“好”，4 表示“较好”，3 表示“一般”，2 表示“较差”，1 表示“差”。

根据模型，在评价体系中，专家打分构成的模糊评判矩阵：

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.3 \\ 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 0.0 & 0.2 & 0.3 & 0.5 & 0.0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.0 \\ 0.0 & 0.1 & 0.5 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.2 \\ 0.1 & 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.2 \\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix} \quad R_4 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.2 \end{bmatrix}$$

把权重向量 \tilde{W}_k 和单因素评判矩阵 R_k 进行合成，得到评判向量 B_k ：

$$B_1 = [0.1261 \quad 0.2044 \quad 0.2743 \quad 0.2579 \quad 0.1374]$$

$$B_2 = [0.1362 \quad 0.3143 \quad 0.2106 \quad 0.2000 \quad 0.1388]$$

$$B_3 = [0.1552 \quad 0.2703 \quad 0.2475 \quad 0.2042 \quad 0.1297]$$

$$B_4 = [0.3278 \quad 0.2091 \quad 0.1755 \quad 0.1587 \quad 0.1290]$$

在第一级模糊综合评判深度学习能力得到的隶属关系，即由主准则层评价因素集 U 对于深度学习能评价等级集合 V 的隶属向量 B_k ，可以构成总评价矩阵 R ，表示为：

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1261 & 0.2044 & 0.2743 & 0.2579 & 0.1374 \\ 0.1362 & 0.3143 & 0.2106 & 0.2000 & 0.1388 \\ 0.1552 & 0.2703 & 0.2475 & 0.2042 & 0.1297 \\ 0.3278 & 0.2091 & 0.1755 & 0.1587 & 0.1290 \end{bmatrix}$$

再次对总评价矩阵 R 和主准则中各评价因素权重值 \tilde{W} ，进行模糊矩阵运算，最终可得到评价目标层对于深度学习能评价等级集合 V 的隶属向量：

$$B = [0.1508 \quad 0.2719 \quad 0.2353 \quad 0.2114 \quad 0.1350].$$

根据模糊综合评价的最大隶属度原则，令 $b = \max\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\} = 0.2719$ ，深度学习能评价等级就是 B 中的最大分量 0.2719，在评价等级集合 V 中所对应的等级“较好”。

4. 总结

深度学习是一个知识迁移的过程, 需要学生具有核心学科知识以及批判性思维、团队协作、自主学习等多个维度的能力, 自主学习、强烈的学习动机、高阶思维能力等都是深度学习的条件要求[13]。本文主要在学生深度学习能力评价系统的实际需求分析基础上, 研究和确定深度学习能力评价指标体系权重的相关算法, 构建出基于 AHP-PCE 的深度学习能力评价模型, 对学生的学习能力进行评价与分析。

在该模型中, 利用层次分析法确定各评价因素权重, 采用数学方法将评价因素进行比较构成判断矩阵, 采用一致性检验的方法保证各评价因素权重值的准确性, 克服了评价因素权重主观性问题。借助模糊数学理论, 采用模糊算子的模糊综合运算, 依据最大隶属度原则确定最终评价等级, 在此过程中, 将定性分析和定量计算有机结合, 提高模型精准度。

深度学习能力评价不仅是对学习者深度学习能力水平的评估, 也是对深度学习过程和结果的评价[14]。本文所建构的评价模型可以根据实际需要对评价指标体系进行调整, 满足教学的应用需求。今后, 该模型仍需要不断进行改进和完善, 以期能够更客观、准确评价学生的深度学习能力。

基金项目

国家自然科学基金项目(11501309); 2023 年江苏省研究生实践创新项目“单元教学促进高中数学深度学习的实践研究”(SJCX23_1773)。

参考文献

- [1] 王文静. 创新的教育研究范式: 基于设计的研究[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2011: 25.
- [2] Marton, F. and Saljo, R. (1976) On Qualitative Difference in Learning: Outcome and Process. *British Journal of Educational Psychology*, **46**, 4-11.
- [3] 何玲, 黎加厚. 促进学生深度学习[J]. 现代教学, 2005(5): 29-30.
- [4] 张浩, 吴秀娟. 深度学习的内涵及认知理论基础探析[J]. 中国电化教育, 2012(10): 7-11.
- [5] 桑新民. 学习科学与技术: 信息时代大学生学习能力培养[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 61.
- [6] 张浩, 吴秀娟, 王静. 深度学习的目标与评价体系构建[J]. 中国电化教育, 2014(7): 51-55.
- [7] [美] L·W·安德森, 等. 学习、教学和评估的分类学——布鲁姆教育目标分类学修订版(简缩本) [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2007: 58-76.
- [8] 吴有昌, 高凌飏. SOLO 分类法在教学评价中的应用[J]. 华南师范大学学报(社会科学版), 2008(3): 95-99.
- [9] 戴忠恒. 情感目标的分类及其测量方法[J]. 心理科学, 1992(3): 35-41.
- [10] [美] D·R·克拉斯沃尔, B·S·布卢姆, 等. 教育目标分类学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1989.
- [11] Saaty, T.L. (2004) Decision Making—The Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, **13**, 1-35. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>
- [12] 沈进昌, 杜树新, 罗祎, 等. 基于云模型的模糊综合评价方法及应用[J]. 模糊系统与数学, 2012, 26(6): 115-123.
- [13] 兰岚. 课堂教学中深度学习的整体性建构[J]. 教育理论与实践, 2022, 42(32): 46-49.
- [14] 梁文鑫, 赵云建. 从“经历”向“能力”迁移: 教师深度学习的影响要素及路径分析[J]. 中国电化教育, 2022(12): 121-128.